

## Chapitre II

## LA RADIOACTIVITE

### Introduction

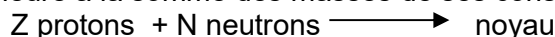
Dans la nature, il existe des noyaux stables et de noyaux instables ou radioactifs.

### I- Stabilité du noyau

Un noyau est instable (radioactif), quand les forces de répulsion entre les nucléons sont supérieures aux forces de cohésion.

#### I-1 Stabilité et énergie de liaison

La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de ses constituants (protons et neutrons).



$$Z m_p + N m_n > m_{\text{noyau}}$$

$$\Delta m = (Z m_p + N m_n) - m_{\text{noyau}} \implies \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$\Delta E$  : l'énergie qui serait libérée au cours de la réaction de la formation du noyau.

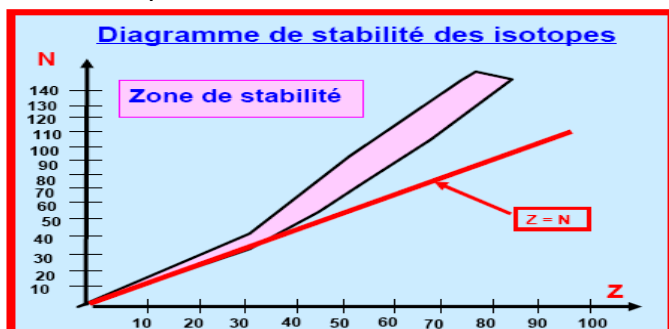
$\Delta E / A$  : l'énergie moyenne de liaison par nucléon

A : nombre de nucléons

**La stabilité est d'autant plus grande que l'énergie de liaison par nucléon est plus élevée**

#### I-2 Stabilité et nombre de nucléons

Les protons chargés positivement se repoussent, l'ajout de neutrons stabilise les nucléides par un effet de "dilution" des charges positives qui en étant plus éloignées les unes des autres auront tendance à moins se repousser.



- Si  $1 \leq z \leq 20$  on a  $N = Z$
- Si  $20 \leq z < 84$  on a  $N > z$   
Il faut davantage pour compenser la répulsion électrostatique des protons.
- Si  $Z \geq 84$   
Les nucléides sont radioactifs : le nombre de neutrons est insuffisant l'effet de «dilution des charges» devient inefficace.

#### I-3 Stabilité et parité des nombres Z et N

Nombre de nucléides stables	Nombre de protons Z	Nombre de neutrons N
166	pair	Pair
57	Pair	Impair
53	Impair	pair
04	impair	Impair

**04 :**  $^2\text{H}$  ;  $^6\text{Li}$  ;  $^{10}\text{B}$  ;  $^{14}\text{N}$

#### I-4 Nombres magiques

Si le nombre de protons ou de neutrons est 2, 8, 20, 50, 82 ou 126 le noyau jouit d'une stabilité particulière et le nucléide correspondant est relativement abondant dans la nature.

Elément	Isotope le plus abondant	Nombre de protons	Nombre de neutrons
$^8_8\text{O}$	$^{16}_8\text{O}$	<u>8</u>	<u>8</u>
$^{19}_{19}\text{K}$	$^{39}_{19}\text{K}$	19	<u>20</u>
$^{20}_{20}\text{Ca}$	$^{40}_{20}\text{Ca}$	<u>20</u>	<u>20</u>
$^{40}_{40}\text{Zn}$	$^{90}_{40}\text{Zn}$	40	<u>50</u>
$^{56}_{56}\text{Ba}$	$^{138}_{56}\text{Ba}$	56	<u>82</u>
$^{58}_{58}\text{Ce}$	$^{140}_{58}\text{Ce}$	58	<u>82</u>
$^{82}_{82}\text{Pb}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	<u>82</u>	<u>126</u>

## II- Radioactivité naturelle

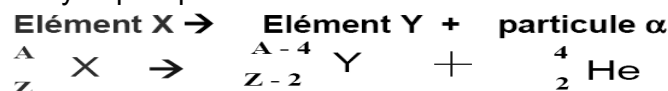
- **En 1896** Henri Beckerel a découvert que les composés de l'uranium émettent une radiation impressionnant les plaques photographiques et ionisant l'air.

- **1898-1899** Pierre et Marie Curie isolèrent 2 éléments plus radioactifs que l'uranium : le polonium et le radium.
- **En 1900** Marie Curie suggère une hypothèse sur la radioactivité : " Les atomes se métamorphosent subissent une transmutation avec émission d'une énergie considérable".

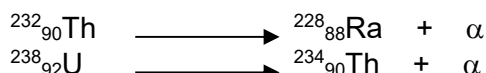
On distingue dans la radioactivité naturelle trois types de rayonnements :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

### II-1 Rayonnement $\alpha$ (hélium) ou émission $\alpha$

Ce sont des noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}^{++}$  en mouvement très rapide émis lors de la transformation d'un noyau lourd ( $Z > 83$ ) en noyau plus petit.



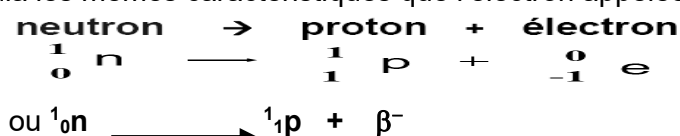
#### Exemples



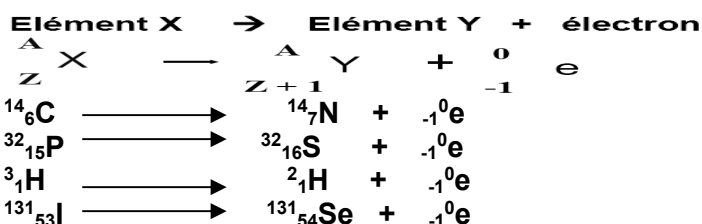
Les particules  $\alpha$  sont directement ionisantes mais peu pénétrantes. Elles ne sont pas dangereuses pour la peau.

### II-2 Rayonnement $\beta^-$ (négaton)

Lorsque le rapport  $N/Z$  est trop élevé, un neutron a tendance à se transformer en proton, il donne naissance à une particule qui a les mêmes caractéristiques que l'électron appelée  $\beta^-$  : négaton.



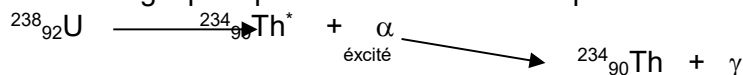
L'électron ne pouvant exister à l'intérieur d'un noyau est alors émis. L'équation nucléaire est :



Elles sont plus pénétrantes mais moins ionisantes que les particules  $\alpha$ . Elles pénètrent la peau sur une épaisseur de quelques millimètres. Elles sont dangereuses pour la peau.

### II-3 Rayonnement $\gamma$

L'éjection des particules  $\alpha$  et  $\beta$  souvent s'accompagnent d'un rayonnement électro-magnétique de très courte longueur d'onde ( $\lambda < 1\text{\AA}$ ) de même nature que les rayons X ou la lumière, se sont les rayons  $\gamma$ . Les rayons  $\gamma$  sont dus au fait que les rayons formés par désintégration radioactive sont souvent à l'état excité et ils tendent à perdre cette énergie pour passer à l'état stable du point de vue énergétique.



L'émission d'un rayonnement  $\gamma$  ne produit ni variation de masse ni de charge.

Ils ne sont pas directement ionisants, mais ils sont très pénétrants.

La radioactivité naturelle est spontanée et elle est dite naturelle parce que les noyaux radioactifs se trouvent à l'état naturel.

### II-4 Les familles radioactives naturelles

On a pu classer les nucléides radioactifs naturels lourds en trois familles :

famille	Série	Exemple	
		Elément de départ	Elément final
1 <sup>ère</sup> famille du thorium	4 a	${}^{232}_{90}\text{Th}$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
2 <sup>ème</sup> famille de l'uranium	4 a + 2	${}^{238}_{92}\text{U}$	${}^{206}_{82}\text{Pb}$
3 <sup>ème</sup> famille de l'actino-uranium	4 a + 3	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{207}_{82}\text{Pb}$

A : nombre entier

- 1- A = 4a
- 2- A = 4a + 2
- 3- A = 4a + 3

### III- radioactivité artificielle

- En 1919, Rutherford réalisa la première transmutation artificielle :  ${}^{14}_7N + {}^4_2He \longrightarrow {}^{17}_8O + {}^1_1H$
- En 1934, découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Joliot Curie : quand ils transformèrent des atomes d'aluminium en atomes d'un isotope radioactif du phosphore

On distingue cinq types de radioactivité artificielle :

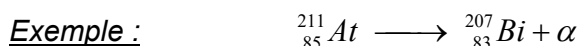
- Radioactivité  $\alpha$  (hélogène)
- Radioactivité  $\beta^+$
- Radioactivité  $\beta^-$
- Radioactivité à neutrons
- Capture d'électron ou capture K

Il y aura encore le rayonnement  $\gamma$  lorsqu'un noyau passera d'un état excité à un état moins excité.

#### III-1 Radioactivité $\alpha$ (hélogène)

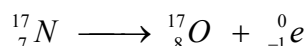
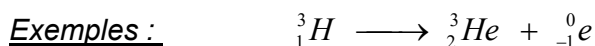
Rare chez les nucléides artificiels.

$Z' = Z$  et  $A' = A$



#### III-2 Radioactivité $\beta^-$ (négativogène)

$Z' = Z + 1$  et  $A' = A$

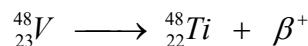
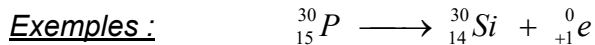


#### III-3 Radioactivité $\beta^+$ (positogène)

Il s'agit en quelque sorte du phénomène "inverse" du précédent.

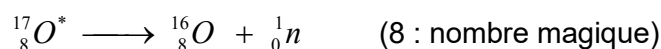
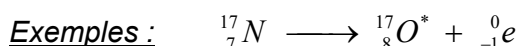
Cette forme de radioactivité concerne les isotopes instables qui possèdent un excès de protons et sont donc situés au dessous de la zone de stabilité.

De tels noyaux chercheront à se stabiliser en augmentant N et en diminuant Z.



#### III-3 Radioactivité neutronique

Rencontrée chez les noyaux très excités, ils ont un nombre de neutrons qui dépasse d'une unité l'un des nombres magiques caractéristiques des noyaux stables.

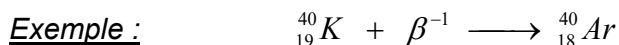


#### III- Capture d'électrons ou capture K

La capture d'électrons est une radioactivité inversée.

Le noyau peut capter un électron périphérique de la couche K.

Une telle capture transforme un proton en un neutron :  $Z' = Z$  et  $A' = A$



Le remplacement de l'électron de la couche K qui a été capté donne lieu à une émission de rayon X.

### IV- Loi de désintégration radioactive

Cette loi s'applique aussi bien aux nucléides radioactifs naturels qu'aux nucléides radioactifs artificiels.

Dans un échantillon donné, le nombre d'atomes radioactifs varie avec le temps.

La désintégration radioactive ne dépend ni de la pression ni de la température ni des combinaisons chimiques dans lesquelles les atomes radioactifs sont impliqués.

Quand le nucléide formé n'est pas radioactif  $A \longrightarrow B$  ; (A radioactif, B stable), On a :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad A : \text{activité absolue, c'est le nombre de désintégration par unité de temps}$$

$N$  : nombre d'atomes radioactifs au temps "t"

$\lambda$  : constante de radioactivité de l'élément étudié

### Evolution au cours du temps

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \int_{N_0}^{N_t} -\frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \Rightarrow \quad \underline{N_t = N_0 e^{-\lambda t}}$$

$N_0$  : nombre d'atomes initial

$N_t$  : nombre d'atomes restant au temps "t"

Le nombre de noyaux ou d'atomes radioactifs décroît exponentiellement avec le temps.

1 mole d'un élément radioactif a une masse  $M$  :

$$M \longrightarrow N_A \text{ atomes} \quad \Rightarrow \quad N_0 = \frac{m_0}{M} N_A \quad \text{et} \quad N_t = \frac{m_t}{M} N_A$$

$$m(g) \longrightarrow N \text{ atomes}$$

$$\frac{m_t}{M} N_A = \frac{m_0}{M} N_A e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad \underline{m_t = m_0 e^{-\lambda t}}$$

### Unités de A :

A est exprimée en :

- désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq)
- désintégrations par minute (dpm)
- Curies (Ci)

Une source de 1 Curie subit  $3,7 \cdot 10^{10}$  dps (1 g de Rd a une activité  $A = 1$  Ci)

### V- Période radioactive :

Certains nucléides radioactifs restent stables pendant des milliards d'années, d'autres se décomposent en une fraction de seconde.

Un processus de désintégration est caractérisé par la période  $T$ .

La période  $T$  ou temps de demi-vie  $t_{1/2}$  est le temps nécessaire pour que la moitié de la substance se désintègre :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad \left( N_{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \right)$$

$$1/2 = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \quad \Rightarrow \quad \underline{T = \frac{\ln 2}{\lambda}} \quad \text{ou} \quad \underline{T = \frac{0,693}{\lambda}}$$

$$\ln 2 = \lambda T$$

- La période  $T$  ne dépend pas du nombre initial des noyaux.
- La température et la pression n'affectent pas la valeur de  $T$ .
- La période caractérise un nucléide donné.

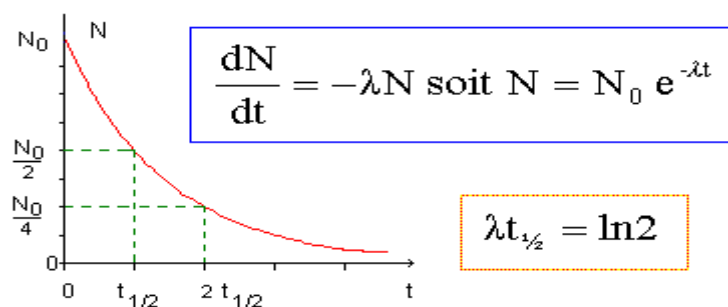
### Exemples

$$^{14}\text{C} (\beta) \quad T = 5700 \text{ ans}$$

$$^{226}_{88}\text{Ra} \quad T = 1620 \text{ ans}$$

$$^{40}\text{K} (\beta) \quad T = 1,3 \cdot 10^9$$

$$^{15}_8\text{O} \quad T = 125 \text{ secondes}$$



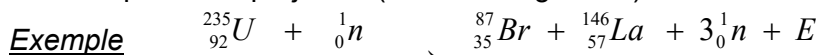
Mise en évidence de la période  $T$

### VI- Réactions nucléaires artificielles

Ces réactions se produisent lorsqu'on bombarde des noyaux par des particules subatomiques telles que : proton, neutron, électron, hélions ...

### VI-1 Réaction de fission

La réaction de fission est la rupture de certains noyaux lourds en 2 fragments de masses comparables, sous l'impact d'un projectile (neutron en général) et libération d'une grande énergie.



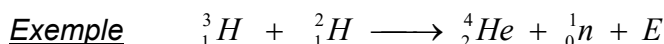
$$A > 200$$

$$72 < A < 162$$

Une fois amorcée, la réaction se poursuit d'elle-même et l'énergie libérée soudainement est explosive (bombe atomique).

### VI-2 Réaction de fusion

C'est la réunion de 2 noyaux très légers en un noyau plus lourd avec expulsion d'un neutron ou d'un proton et libération d'une très grande énergie.

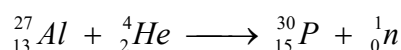
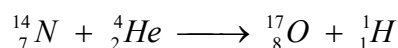


L'énergie libérée es considérable, mais la réaction demande une température très élevée  $\approx 1$ million  $^{\circ}\text{C}$ . La bombe d'hydrogène est une application directe de ces réactions thermonucléaires). Le contrôle de l'énergie libérée n'est pas encore résolu.

### VI-3 Transmutations nucléaires

Ces réactions produisent des nucléides de nombre de masse très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible.

#### Exemples



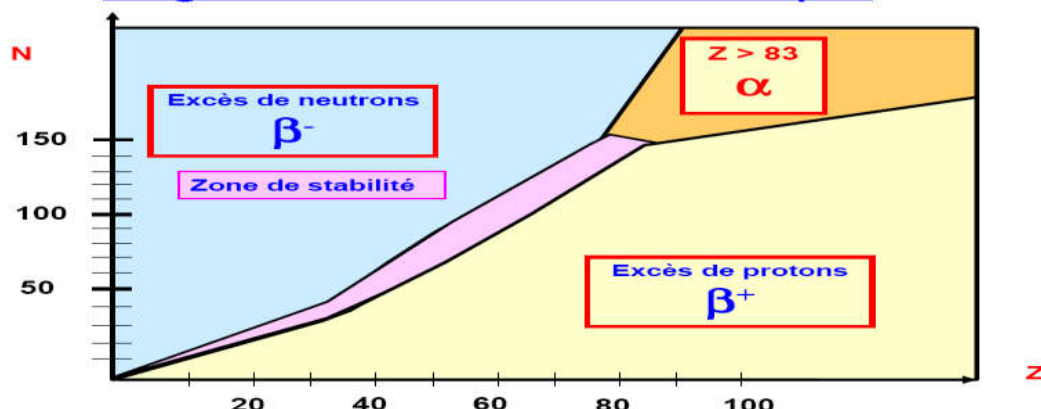
### VII- Energie et défaut de masse

L'énergie libérée lors des réactions nucléaires est calculée par le principe d'Einstein :

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

### VIII- Prévion « a priori » du type de radioactivité d'un isotope instable

Diagramme de stabilité des isotopes



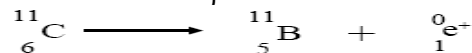
Il suffit de comparer le nucléide instable avec un nucléide stable du même élément. Pour se stabiliser, l'isotope instable va chercher à se rapprocher de la structure de l'isotope stable.

#### Exemple du carbone (Z = 6)

Isotopes stable :  ${}^{12}\text{C}$  : 6 protons et 6 neutrons

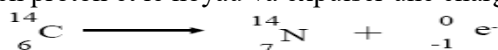
Isotope instable :  ${}^{11}\text{C}$  : 6 protons et 5 neutrons

Pour « ressembler » à  ${}^{12}\text{C}$  il lui faudrait un neutron supplémentaire. Un proton va donc se transformer en neutron et le noyau va expulser une charge positive : émetteur  $\beta^+$



Isotope instable :  ${}^{14}\text{C}$  : 6 protons et 8 neutrons.

Un neutron va donc se transformer en proton et le noyau va expulser une charge négative : émetteur  $\beta^-$



**Exercice**

On connaît six isotopes du fluor ( $Z=9$ ) dont les nombres de masses sont  $A=17, 18, 19, 20, 21, 22$  ; seul l'isotope  $^{19}_9F$  est stable. Peut-on prévoir le type radioactivité que présentent les autres isotopes ?

**Solution**

$^{17}_9F$	$^{18}_9F$	$^{19}_9F$	$^{20}_9F$	$^{21}_9F$	$^{22}_9F$
9p et 8n	9p et 9n	9p et 10n	9p et 11n	9p et 12n	9p et 13n
$n \leq p$ ( $\beta^+$ )		STABLE		$n > p$ ( $\beta^-$ )	

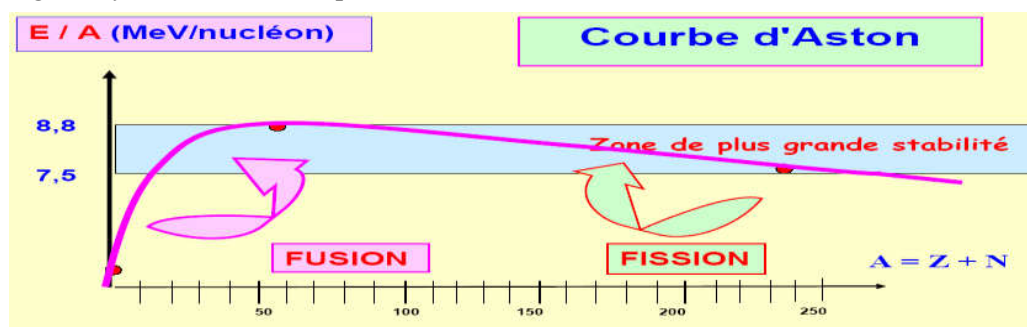
Sachant que dans le cas où on a :

- Un excès de neutrons :  $^1_0n \longrightarrow ^1_1p + \beta^-$
- Un excès de protons :  $^1_1p \longrightarrow ^1_0n + \beta^+$

**Courbe d'Aston**

Un noyau sera d'autant plus stable que son énergie de cohésion sera grande.

On porte l'énergie moyenne de cohésion par nucléon  $E/A$  en fonction de  $A$



La courbe obtenue présente un maximum vers  $A = 60$ , les atomes correspondant étant les atomes les plus stables qui existent.

Les atomes dont l'énergie moyenne de liaison par nucléon est faible (de  $E/A < 7,5$  MeV / nucléon) vont chercher à se stabiliser et à se rapprocher de la zone de stabilité maximale vers  $A = 60$ . Deux processus différents sont possibles :

- ✓ Stabilisation des « atomes légers » = FUSION
- ✓ Stabilisation des « atomes lourds » = FISSION

**IX- Applications de la radioactivité****1) En chimie :**

- Détermination des structures moléculaires ;
- Mécanismes des réactions
- Etude des phénomènes d'absorption et de diffusion ;
- Contrôle de l'efficacité des méthodes de séparation et de purification ;
- Mesures de la solubilité de corps réputés insolubles ; Etude des métabolismes parmi lesquelles : l'établissement du cycle du carbone dans la photosynthèse chlorophyllienne et la biosynthèse de l'hémoglobine

En introduisant dans une molécule à la place d'un atome déterminé ( $^{12}C$ ,  $^1H$ ,...) l'isotope ( $^{13}C$ ,  $^2H$ , ....), ces isotopes peuvent être suivis grâce à leur rayonnement.

**2) En médecine et biologie :**

Utilisation des radioisotopes pour le diagnostic et le traitement des maladies et pour fournir de précieux renseignements sur le mécanisme des réactions biologiques.

L'iode 131 diminue l'hyperactivité de la thyroïde et permet le traitement des goîtres.

**3) Datation des roches :**

Détermination du rapport  $^{206}Pb$  et  $^{207}Pb$  dans un minerai d'uranium

**4) Datation des pièces archéologiques :**

Pendant la vie : il y a équilibre absorption et désintégration du carbone  $^{14}C$ .

Quand la vie cesse :  $A$  diminue.

**X- Dangers de la radioactivité**

- Effets pathologiques : cancers, leucémie, lésions des muqueuses...
- Effets génétiques : les effets se rapportent sur les générations futures.